

## 論文の内容の要旨

論文題目	無線電力伝送における同時複数給電の実現と受電器の配置自由度改善に関する研究
学位 申請者	早馬 道也

本論文では、共鳴方式の無線電力伝送における複数機器への同時給電と、受電器の配置自由度改善という課題に対して、マルチホップ無線電力伝送を用いた電力分配方式と、位置ずれに対する結合度変化を抑制する2種類の共振器構造を提案し、実験評価によりその実現性を示した。前者は、共鳴方式の無線電力伝送において送電側共振器と受電側共振器の間に中継共振器を配置することで電力をマルチホップさせることが可能であることを利用し、複数直列に配置した各中継共振器に対して設定した比率で電力分配を実現するものである。後者は、水平方向に配置したコイル同士の結合と、垂直方向に配置したコイル同士の結合、導電板間の電界結合が、それぞれ距離に対して異なる分布をとることに着目し、これらを組み合わせることで距離に対する結合度変化の抑制を可能にするものである。

第2章では、共振器間の結合度を測定する方法として、2つの共振器を結合させた際に生じる2つの共振周波数を直接読み取る従来法に加えて、測定したYパラメータと回路方程式から相互インダクタンスを導出して結合度を求める方法と、Yパラメータの行列式を解くことで共振周波数を解析する方法の2通りの測定方法を示した。相互インダクタンスから結合度を求める方法は、測定対象が使用した等価回路モデルによって限定されるが、従来法のように測定対象と測定器を疎結合にする必要がないといったメリットがある。また、行列式を解く方法については、共振周波数の導出がYパラメータの固有値を求めることと等価であること、共振器の損失を考慮した場合であっても結合度の算出が可能であることを示した。

第3章と第4章では、送電側共振器と受電側共振器の間に中継共振器を $n-2$ 個直列に配置した構成が、 $n$ 段BPFとして設計できることを示したうえで、各中継共振器に設定した比率で電力分配を実現する回路構造及び回路パラメータを導出する方法を明らかにした。さらに、均等分配と不均等分配の



2通りの電力分配比率を7ノード、6ホップの無線電力伝送系に設定し、シミュレーション及び実験による評価を行い電力分配が実現されることを示した。また提案方式は、中継共振器への電力供給をON-OFFすることにより、末端から末端への1対1の給電と、中継器を含むすべての受電器に対する1対多の給電の切り替えが可能である。中継共振器への電力供給の切り替えについても、実験を行い、実現性を確認した。

第5章では、距離に対する結合度変化を抑制する共振器構造として、第1に水平コイルと垂直コイルを組み合わせた2軸コイル構造を提案した。同構造について、距離に対する結合度の変化をノイマンの公式により導出した結合度の計算式の1階微分として表すことで、設定した距離で結合度変化が最小となるようなコイルの寸法を導出する手順を明らかにした。さらに、同手順を用いて導出した2軸コイル構造の寸法を基準に作製したプロトタイプが設計した距離で結合度変化を抑制する領域を有することを実験により示した。第2に垂直コイルによる磁界結合と導電板間の電界結合を組み合わせた構造を提案した。同構造の等価回路モデルについてDifferentialモードにおける結合度を表す式を導出し、2軸コイルと同様に特定の距離において結合度変化が最小となる特性を有することを示した。さらに、作製したプロトタイプについて結合度の測定を行い、結合度変化を抑制する領域を有することを実験により示した。

第4章で提案した電力分配手法は、直列に配置した受電器に対して電力分配を実現するものであり、送電器の外周ないしは囲まれた領域に対して電力分配を実現する従来提案とは異なる長距離を一定間隔で並ぶセンサーへの給電などのアプリケーションが期待できる。一方、提案方式は、受電器の配置間隔がマルチホップ無線電力伝送系の設計時に求めた共振器間の結合度によって制約を受けるため、アプリケーションによって自由に決定することができない。今後、第5章で提案した距離に対する結合度変化を調整することのできる共振器構造を併用するなどして、配置に対する制約を緩和する方法を検討する必要がある。

また、第5章で提案した2種類の共振器構造は、いずれも動的な整合回路なしで共振器間の距離が最大効率を得られる距離からずれた際の伝送効率低下を防ぐことが可能であり、ロボットやモバイル機器への給電といった移動する対象への無線給電に有用である。一方で提案方式は、いずれも2種類の結合の差をとることによって結合度変化を抑制するため、従来方式と比較して得られる結合度が小さく、最大伝送効率は低下する。最大伝送効率の問題については、打ち消す結合度の量を減らし伝送効率を改善することが可能である。提案方式において、結合度変化の抑制効果と伝送効率の間にはトレードオフの関係があり、今後、用途に応じて最適な動作点を決定する方法を検討していく必要がある。

本論文で提案した電力分配手法と共振器構造は、無線電力伝送のアプリケーションの幅を広げるものであり、今後、他の制御技術や回路構造、ソフトウェアと組み合わせることで、無線電力伝送技術の実用化に寄与するものと考えられる。



## 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 早馬 道也

審査委員主査 和田 光司

委員 肖 鳳超

委員 安藤 芳晃

委員 石川 亮

委員 萱野 良樹

委員

委員

本論文では、共鳴方式の無線電力伝送における複数機器への同時給電と、受電器の配置自由度改善という課題に対して、マルチホップ無線電力伝送を用いた電力分配方式と、位置ずれに対する結合度変化を抑制する2種類の共振器構造を提案し、実験評価によりその実現性を示した。前者は、共鳴方式の無線電力伝送において送電側共振器と受電側共振器の間に中継共振器を配置することで電力をマルチホップさせることが可能であることを利用し、複数直列に配置した各中継共振器に対して設定した比率で電力分配を実現するものである。後者は、水平方向に配置したコイル同士の結合と、垂直方向に配置したコイル同士の結合、導電板間の電界結合が、それぞれ距離に対して異なる分布をとることに着目し、これらを組み合わせることで距離に対する結合度変化の抑制を可能にするものである。

第2章では、共振器間の結合度を測定する方法として、2つの共振器を結合させた際に生じる2つの共振周波数を直接読み取る従来法に加えて、測定しアドミタンスパラメータと回路方程式から相互インダクタンスを導出して結合度を求める方法と、アドミタンスパラメータの行列式を解くことで共振周波数を解析する方法の2通りの測定方法を示した。相互インダクタンスから結合度を求める方法は、測定対象が使用した等価回路モデルによって限定されるが、従来法のように測定対象と測定器を疎結合にする必要がないといったメリットがある。また、行列式を解く方法については、共振周波数の導出がYパラメータの固有値を求めることと等価であること、共振器の損失を考慮した場合であっても結合度の算出が可能であることを示した。

第3章と第4章では、送電側共振器と受電側共振器の間に中継共振器を $n-2$ 個直列に配置した構成が、 $n$ 段バンドパスフィルタとして設計できることを示したうえで、各中継共振器に設定した比率で電力分配を実現する回路構造及び回路パラメータを導出する方法を明らかにした。

さらに、不均等分配の均等分配と2通りの電力分配比率を7ノード、6ホップの無線電力伝送系に設定し、シミュレーション及び実験による評価を行い、電力分配が実現されることを示した。また提案方式は、中継共振器への電力供給をON-OFFすることにより、末端から末端への1対1の給電と、中継器を含むすべての受電器に対する1対多の給電の切り替えが可能である。中継共振器への電力供給の切り替えについても、実験を行い、実現性を確認した。

第5章では、距離に対する結合度変化を抑制する共振器構造として、第1に水平コイルと垂直コイルを組み合わせた2軸コイル構造を提案した。同構造について、距離に対する結合度の変化をノイマンの公式により導出した結合度の計算式の1階微分として表すことで、設定した距離で結合度変化が最小となるようなコイルの寸法を導出する手順を明らかにした。さらに、同手順を用いて導出した2軸コイル構造の寸法を基準に作製したプロトタイプが設計した距離で結合度変化を抑制する領域を有することを実験により示した。第2に垂直コイルによる磁界結合と導電板間の電界結合を組み合わせた構造を提案した。同構造の等価回路モデルについてDifferentialモードにおける結合度を表す式を導出し、2軸コイルと同様に特定の距離において結合度変化が最小となる特性を有すること示した。さらに、作製したプロトタイプについて結合度の測定を行い、結合度変化を抑制する領域を有することを実験により示した。

本論文で提案した電力分配手法と共振器構造は、無線電力伝送のアプリケーションの幅を広げるものであり、今後、他の制御技術や回路構造、ソフトウェアと組み合わせることで、無線電力伝送技術の実用化に寄与するものと考えられる。

本研究に関して、以上の内容の発表に対して質疑応答を行い、同時に申請者の研究に対する資質、能力、基礎学力について総合的に評価を行った。その結果、申請者が研究を推進する能力を十分有すること、また工学的立場から詳細に論文を記述していることを確認した。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。